

Approche biogéochimique pour l'analyse spatiale et temporelle des systèmes de production agricole en France depuis la fin du XIXe siècle

Julia Le Noë^{1*}, Gilles Billen¹, Josette Garnier¹

¹ Université P&M Curie/CNRS, UMR Metis 7619, Paris

* julia.le_noe@upmc.fr

Résumé

L'analyse des trajectoires socio-écologiques du système Seine ne peut faire l'économie d'une description détaillée des mutations des systèmes de production agricole qui sont aujourd'hui un déterminant majeur de l'état de l'hydrosystème. A partir d'une démarche de biogéochimie territoriale, nous retraçons ici l'évolution des flux d'azote et de phosphore à travers les systèmes agro-alimentaires de 33 régions françaises au cours de la période 1852-2014. Une typologie des systèmes de production est proposée, qui permet de suivre la spécialisation progressive des régions françaises et l'ouverture de leur cycle de nutriments depuis le milieu du XIXe siècle, période encore caractérisée par l'omniprésence de la polyculture-élevage, et l'insuffisance des apports phosphorés aux sols. La généralisation du recours massif aux engrais chimiques dans la deuxième moitié du XXe siècle conduit à l'explosion des surplus azotés et à la constitution de stocks considérables de phosphore dans les sols arables. Le raisonnement de la fertilisation, au cours de la dernière décennie, conduit à stabiliser les surplus azotés et à réduire lentement les stocks de phosphore.

Introduction

L'analyse des dynamiques et des trajectoires socio-écologiques du système Seine est au cœur du programme de la phase 7 du PIREN-Seine. Le système de production agricole joue un rôle central dans ces dynamiques parce qu'il occupe la plus grande place, tant dans l'espace du bassin versant que dans les flux de matière caractérisant le métabolisme du système. Il est aujourd'hui un des principaux déterminants de l'état de l'hydrosystème.

L'analyse sur le temps long des mutations qui ont affecté le système agro-alimentaire est essentielle pour mettre à jour les déterminants des dynamiques encore à l'œuvre aujourd'hui, et fournir ainsi une base pour l'élaboration de scénarios prospectifs. Cette approche de reconstitution historique est en outre indispensable pour appréhender la question des héritages que constitue l'accumulation dans les sols de stocks à longue durée de vie comme ceux du phosphore ou du carbone.

Cette note propose un tableau synthétique des coévolutions des systèmes de production agricole et des flux de l'azote (N) et du phosphore (P) en France depuis 1852 jusqu'à aujourd'hui, à l'échelle territoriale. L'étude des trajectoires des systèmes agricoles sous l'angle des flux d'N et de P offre un prisme d'analyse original, indiquant à la fois le degré d'ouverture de ces systèmes et leurs performances environnementales et agronomiques en termes d'efficacité d'utilisation de l'N et du P, de bilans P et de surplus d'N. Nombre de

publications récentes se sont attachées à analyser les métabolismes socio-écologiques de la biomasse ou des nutriments impliqués dans la production agricole à des échelles variées, du local au global en passant par le national (Carmo et al., 2017 ; Güldner and Krausmann, 2017 ; Soto et al., 2016 ; Haberl et al., 2007). De plus en plus, ces approches sont non seulement spatiales, mais également temporelles (Soto et al., 2016 ; Güldner and Krausmann, 2017). Néanmoins, à notre connaissance, l'histoire de l'agriculture en France n'a que très peu fait l'objet d'une caractérisation biogéochimique. On peut tout de même remarquer les travaux récents de Harchaoui et Chatzimpiros (2017) qui ont étudié les transformations de l'élevage et ses conséquences sur l'utilisation des terres et les échanges de denrées agricoles de la France sur la période 1961-2010. Cependant, l'échelle nationale de leurs travaux ne permet ni de capturer les disparités régionales ni d'appréhender les coévolutions de l'élevage et de la production arable.

Les questions scientifiques auxquelles nous cherchons à répondre sont les suivantes : quelles trajectoires ont conduit aux systèmes de production actuels ? Quels en ont été les principaux moteurs ? Quelles sont les conséquences de ces trajectoires agricoles en termes de fonctionnement des cycles biogéochimiques ? Quels en sont les héritages ? Pour répondre à ces questions notre étude commence en 1852, date des premiers apports d'engrais phosphorés, jusqu'à aujourd'hui (2014) en considérant les 33 territoires agricoles français tels que définis par Le Noë et al. (2016).

1 Matériel et Méthode

1.1 Cadre conceptuel de la méthode

Pour représenter les systèmes de production agricole à l'échelle territoriale, nous employons l'approche GRAFS (pour Generalized Representation of Agro-Food Systems). Il s'agit d'une démarche de représentation synthétique des systèmes agro-alimentaires sous l'angle de leur fonctionnement biogéochimique, basée sur un bilan détaillé des flux de nutriments impliqués dans la production, la transformation et la consommation de produits animaux et végétaux dans un territoire, ainsi que des fuites environnementales associées. Elle a été développée d'abord pour représenter les systèmes agro-alimentaires à l'échelle de 12 macro-régions du monde, dans le cadre de travaux sur la sécurité alimentaire mondiale (Lassaletta et al., 2014 ; Billen et al., 2014, 2015), mais s'applique aussi bien à des échelles territoriales plus restreintes, voire à l'échelle de l'exploitation agricole.

Son principe consiste dans la représentation quantitative des flux d'N et de P entre 4 compartiments principaux constitutifs du système agro-alimentaire territorial : les terres arables, les prairies permanentes et semi-naturelles, le cheptel animal et la population (Figure 1).

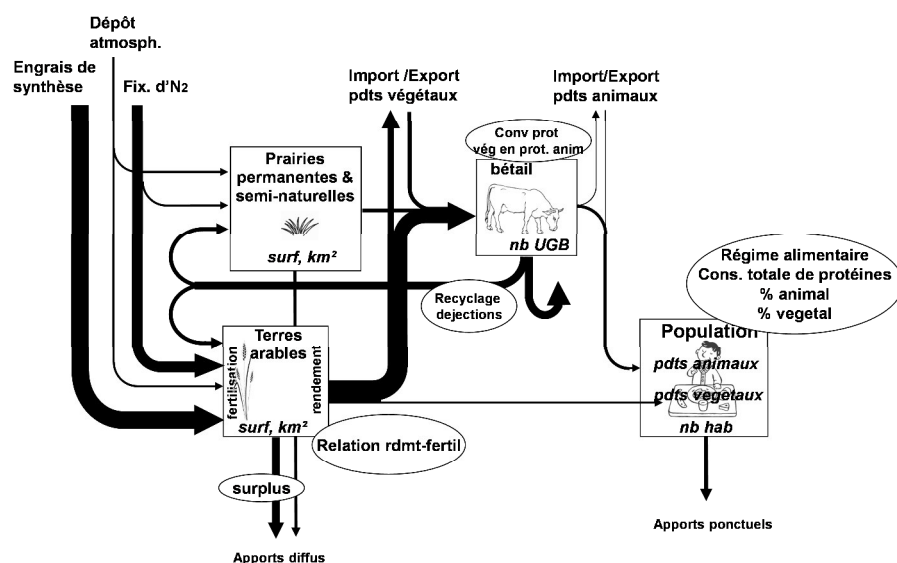


Figure 1. Le modèle GRAFS-N des relations entre les différents flux d'azote impliqués dans les systèmes agro-alimentaires.

1.2 Sources des données

La construction des bilans GRAFS pour la période étudiée repose sur la collecte et la compilation de données empiriques, principalement de production agricole et de consommation humaine, et d'hypothèses théoriques sur la circulation des flux de nutriments d'un compartiment à l'autre. Les 22 dates sélectionnées sont: 1852, 1885, 1906, 1929, 1946, 1955, 1965, 1970, 1974, 1978, 1981, 1985, 1989, 1993, 1997, 2000, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014.

Les données de production et de surface agricoles sont fournies par la Statistique Agricole Nationale pour la période antérieure à 1970 et par Agreste pour la période récente. Les teneurs en N et P des productions animales et végétales ont été agrégées depuis différentes sources (Lassaletta et al., 2014 : compilation des données FAO ; Garnier et al., 2015, Suppl Mat, compilation de diverses sources ; USDA ; Mello et al., 1978). Nous avons considérés que ces teneurs étaient restées constantes sur la période étudiée.

La fertilisation chimique en N et P à l'échelon départemental est fournie par l'UNIFA sur la période récente (1971-2014) et par la Statistique Agricole Nationale sur la période précédente (1929-1955). Pour la période 1852-1906 nous ne disposons que d'estimations nationales assez grossières pour la fertilisation chimique en P (Duby et Wallon, 1993) tandis que la fertilisation chimique en N peut être négligée.

Les effectifs et la structure détaillée du cheptel sont fournis par les statistiques agricoles en nombre de têtes d'animal. La composition des déjections en N et P et les taux d'excrétion pour les différents animaux ont été documentés pour les périodes historiques et actuelles (Girardin 1844, 1864 ; Bertin, 1856 ; Girardin et Morière 1867 ; Gueymard 1868, Rousset, A. 1875 ; Gros, 1957 ; Noirfalise, 1974 ; Comifer, 2014). Les taux d'excrétion par tête varient considérablement au cours de la période étudiée et entre les différentes régions, comme le montre la figure 2 sur l'exemple des bovins.

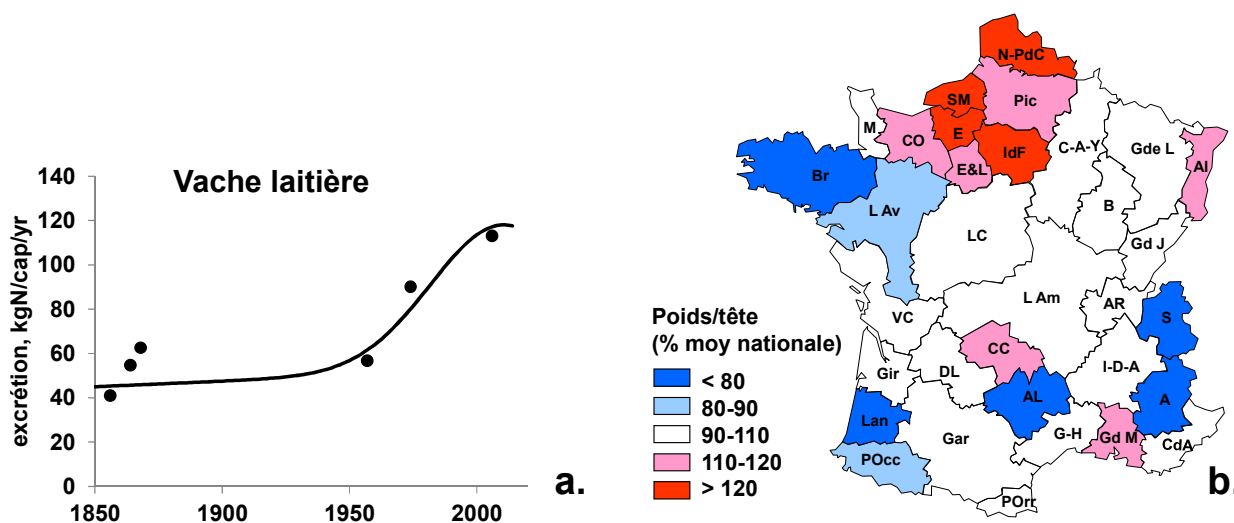


Figure 2. a. Evolution de l'excrétion d'une vache laitière depuis le milieu du XIXe s. b. Variation du poids moyen des bovins abattus (kg carcasse par tête) exprimé en % de la moyenne nationale (entre les différentes régions françaises en 1852 (Les différences régionales s'estompent largement à partir de 1955).

La clé de répartition des excréments animales entre prairies permanentes et terres arables est connue pour l'actuel (Enquête Nopolu 2012) ; pour le passé, des hypothèses ont été réalisées sur base de descriptions qualitatives sur la conduite historique du troupeau (Risse, 2003 ; Duby et Wallon, 1993).

Les données concernant les entrées et sorties mineures d'N et de P sur les TA et PP ont également été collectées : dépôt atmosphérique d'azote (EMEP) et de phosphore (Némery et Garnier, 2005), semences (Garcia-Ruiz et al., 2012 ; Toutain, 1960 ; Chambre d'Agriculture de la Manche), boues de stations d'épuration et gadoues (F. Esculier, communication personnelle). Bien que documentées, ces données comportent un plus grand degré d'incertitude.

Une notice technique détaillée des bases de données et des hypothèses sous-jacentes au modèle GRAFS est disponible sur demande.

2 Quelques résultats bruts

2.1 Analyses de quelques trajectoires types

Il est possible, à partir de la méthode GRAFS, d'examiner les trajectoires de chaque région française depuis 1852. La figure 3, qui présente pour trois dates différentes l'évolution des systèmes de production agricole de trois régions ayant aujourd'hui des systèmes de production contrastés : la Bretagne, le Calvados-Orne et la Picardie, permet de se faire une idée du type d'information qui peut être tirée de l'analyse GRAFS.

En 1852, les trois régions sont caractérisées par l'autonomie de la production agricole, le couplage étroit de la culture et de l'élevage, l'autoconsommation de la production et des exportations faibles ou inexistantes par rapport au volume de production. Un peu plus de cent ans plus tard, si les trois régions semblent se différencier suivant des schémas de production divergents, le point commun entre ces évolutions apparaît dans l'intensification des flux. On observe partout la dépendance aux engrais de synthèse et l'augmentation des surplus arable d'N. Pour la Picardie, une spécialisation en grande culture semble déjà caractériser le système agricole. En effet, la densité du cheptel reste celui de 1852 tandis que la production arable a plus que doublé et que la plus grande partie est exportée vers d'autres régions. La Bretagne et le Calvados-Orne montrent une fertilisation des terres arables équilibrée entre fumier et fertilisation chimique, néanmoins, la Bretagne importe déjà une part significative de l'alimentation de son bétail. A l'inverse, dans le Calvados-Orne les prairies permanentes contribuent à plus de 60% à l'alimentation du cheptel et la région reste autonome pour sa production animale. La période actuelle continue d'accentuer les divergences déjà constatées pour 1970. La Bretagne semble se spécialiser définitivement dans l'élevage intensif. La densité du cheptel a doublé en 40 ans et le bétail est alimenté pour la plus grande partie par des imports de soja et de tourteaux en provenance d'Amérique Latine. La Picardie exporte désormais plus de 80% de sa production végétale et fertilise ses terres arables à plus de 85% par des fertilisants de synthèse. Enfin le Calvados-Orne qui était autonome pour sa production animale en 1970 semble désormais dépendre, certes pour une faible part, d'importation de fourrage.

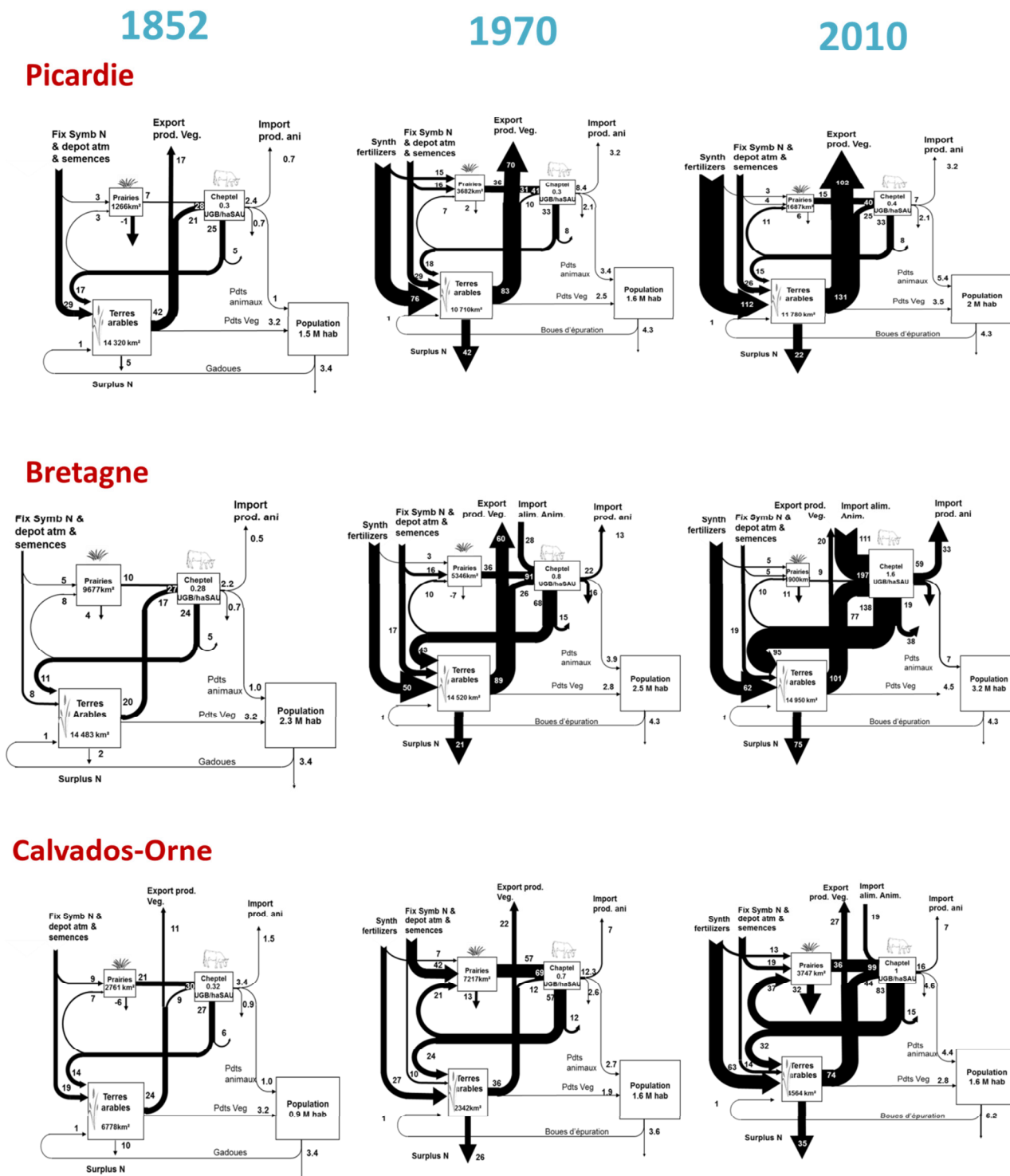


Figure 3. Représentation GRAFS des systèmes de production agricole sous l'angle de la circulation des flux d'azote pour la Picardie, la Bretagne et le Calvados en 1852, 1970 et 2010. Les flux d'azote sont donnés en kgN/ha de SAU/an

2.2 Conséquences de ces trajectoires sur la fertilité des sols en P

Le cas du P mérite une attention particulière car, étant un élément peu mobile dans les sols, lorsque les bilans arables sont positifs, les stocks de P s'accroissent. Les bilans cumulés de P dans les sols arables des

différentes régions agricoles sont aujourd'hui très contrastés, allant de 180 kgP/ha pour l'Eure à 3650 kgP/ha pour la Manche sur la période étudiée (1852 à 2014). Ces différences résultent de trajectoires régionales spécifiques qu'il convient d'examiner au cas par cas.

Pour les trois régions exemples la constitution de réserves de P dans les sols est quantitativement très différente mais suit des schémas assez similaires jusque dans les années 1990 (Figure 4). Les bilans cumulés du P restent négatifs partout au moins jusqu'au début du XXème siècle en raison de l'insuffisance des apports de P au sol. Cette insuffisance a été bien documentée par les agronomes et les historiens (Boulaine, 1995). Cependant, il est possible que nous sous-estimions en partie les bilans P pour la fin du XIXème et le tout début du XXème car certains apports de P aux sols arables tels que les scories de déphosphoration ou les apports de Guano du Pérou n'ont pu être pris en considération faute de données disponibles à l'échelle régionale. A partir des années 1960 et jusque dans les années 1990, la fertilisation chimique en P, parfois combinée à des apports de P dans les déjections animales, conduit à des bilans cumulés très positifs et ainsi, à la constitution d'importants stocks de phosphore dans les sols (Figure 4).

Pour la période actuelle, les bilans cumulés de P sur les terres arables se stabilisent en Bretagne mais continuent d'être élevés, cette fois en raison des apports excessifs de déjections animales (Figure 4). Par ailleurs, il est remarquable que l'épandage des déjections animales sur les terres arables de Bretagne ne représente pas en réalité un recyclage interne puisque le bétail est nourri en grande partie par des aliments importés d'Amérique du Sud. Ainsi, en Bretagne, les stocks de P hérités depuis les années 50 proviennent en majeure partie des engrais chimiques importés soit depuis des régions minières, soit depuis les sols d'Amérique du Sud dans lesquels les fourrages qui alimentent le bétail breton ont puisé les réserves en P. En revanche, le Calvados-Orne a accumulé du P dans les sols de ses terres arables provenant principalement des engrais chimiques employés durant la période 1965-1990 et d'un transfert de fertilité depuis les prairies permanentes vers les terres arables. En effet, dans le Calvados-Orne, les apports de fumier aux terres arables représentent une part importante de la fertilisation P et sont principalement issus du recyclage interne des nutriments (Figure 4). Enfin, dans les régions de grandes cultures historiquement telles que la Picardie, l'héritage de stocks de P provient quasiment entièrement des engrais chimiques. Au cours de la période récente, la baisse des taux de fertilisation en P combinée aux rendements arables élevés de cette région induisent des bilans P négatifs, ce qui conduit à une progressive diminution des stocks hérités au cours des soixante dernières années (Figure 4).

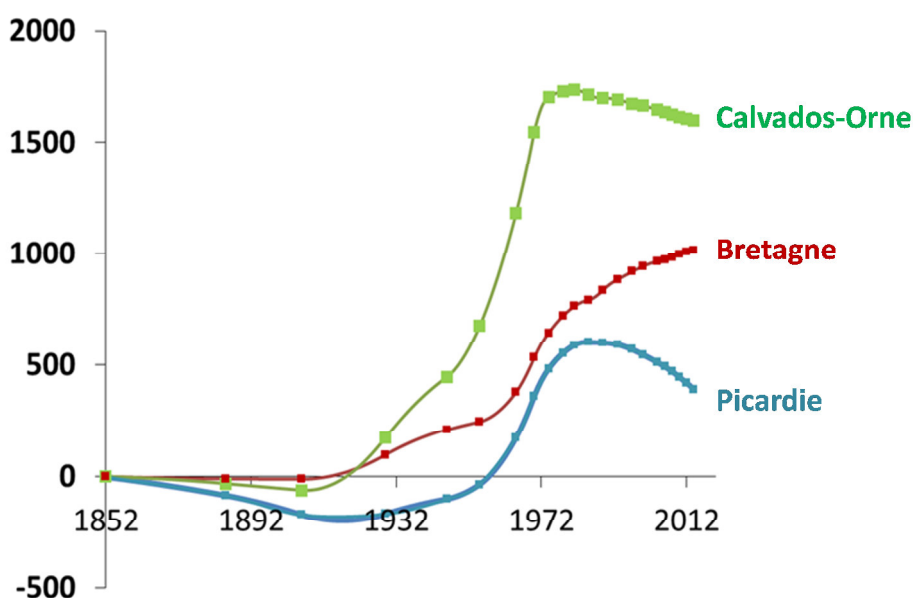


Figure 4. Evolution pour les terres arables, des bilans P cumulés pour trois régions aux trajectoires agricoles contrastées : le Calvados-Orne, la Picardie et la Bretagne.

La nature, l'origine et la quantité des stocks de P hérités du passé sont fonction des trajectoires de chaque région. Le P étant une ressource minière non renouvelable, on peut considérer qu'il existe une dette écologique pour le P (voir Timmons Roberts et Parks, 2009 pour une définition possible de la notion de dette écologique). L'historique de la fertilisation et des bilans P incitent à envisager la fertilité des sols dans ses dimensions sociales et naturelles, puisque, si la fertilité est généralement considérée comme une propriété du sol, elle est également un produit de l'histoire qu'il conviendrait d'éclairer à la lumière des tensions politiques, économiques et sociales afin de mieux en rendre compte. Les questions du passé ont en effet une importance pour le futur. Dans un avenir plus ou moins proche où la raréfaction des ressources minières risque de limiter la disponibilité du P, la formule « du passé faisons table rase » (Eugène Pottier, 1871) ne pourra s'appliquer dans le cas de la gestion du P. La gestion future du P sur les terres arables devra donc tenir compte à la fois des besoins des plantes, des stocks hérités pouvant y subvenir, de la biodisponibilité du P dans les sols et des besoins des plantes dans d'autres régions et pays n'ayant pas pu bénéficier des mêmes apports par le passé que les régions aujourd'hui les mieux dotées.

3 Elaboration d'une typologie des systèmes de production agricole

3.1 Critères de typologie

Les 33 territoires étudiés et les 22 dates sélectionnées ne peuvent faire l'objet d'autant de monographies. L'étude des trajectoires des systèmes de production agricole passe par l'objectivisation de différents types de système. Nous proposons donc une typologie visant à caractériser la structure des systèmes de production agricole à l'échelle territoriale, sur la base de leur degré de spécialisation, d'ouverture ou d'autonomie, et de connexion entre culture et élevage. Pour ce faire, nous élaborons des critères biogéochimiques permettant de déterminer le degré d'interaction entre terres arables, cheptel et prairies permanentes. Nous qualifions de biogéochimiques les critères basés sur des flux ou des ratios de flux. L'arbre de décision (Figure 5) permet de formaliser la logique de différenciation des types de système de production agricole, les critères utilisés et les seuils fixés. Cette typologie est établie sur la base des données de production et de fertilisation en N mais les types de régions ainsi délimitées peuvent ensuite être analysés en termes de flux de P.

Les catégories définies par l'arbre de décision peuvent être définies de la façon suivante :

- Les systèmes de *grandes cultures* sont définis par une production arable l'emportant nettement sur les activités d'élevage et dans lesquels par conséquent la fertilisation est assurée majoritairement par les engrais de synthèse.
- Les systèmes d'*élevage intensif spécialisé* sont caractérisés par des densités de cheptel importantes et dépendantes de l'importation d'aliment pour animaux. La connexion entre l'élevage et les terres arables est assurée par une proportion importante de recyclage des excréments animaux dans la fertilisation.
- Dans les systèmes de *polyculture-élevage extensifs*, au contraire, les activités d'élevage sont connectées aux prairies permanentes et aux terres arables car l'alimentation du bétail provient en grande partie des prairies permanentes et les déjections animales contribuent de manière significative à la fertilisation des terres arables.
- Les systèmes de *polyculture-élevage intensifs* sont des systèmes où les activités d'élevage sont peu connectées aux prairies permanentes du fait de la faible part de l'alimentation du bétail sur les prairies permanentes, mais connectées aux terres arables en raison de la part importante de recyclage des excréments animaux dans la fertilisation des terres arables et/ou de la part importante de production arable locale dans l'alimentation du bétail.
- Enfin, les systèmes de *cultures intensives-élevage extensif* sont caractérisés par des activités d'élevage très dépendantes des prairies permanentes du fait de la part importante de celles-ci dans l'alimentation du bétail, mais peu connectées aux terres arables en raison de la faible part de recyclage des excréments animaux dans la fertilisation des terres arables et de la faible proportion de production arable locale dans l'alimentation du bétail.

Il existe par ailleurs un autre type de systèmes « *feed-lot* » dont des densités de cheptel sont importantes et dépendantes de l'importation d'aliment pour animaux exogènes au territoire. Les déjections animales ne

rennent que pour une faible part dans la fertilisation des terres arables, qui, si elles existent sur le territoire sont largement déconnectés de l'élevage (cette forme typologique ne se rencontre pas en France au cours de la période étudiée).

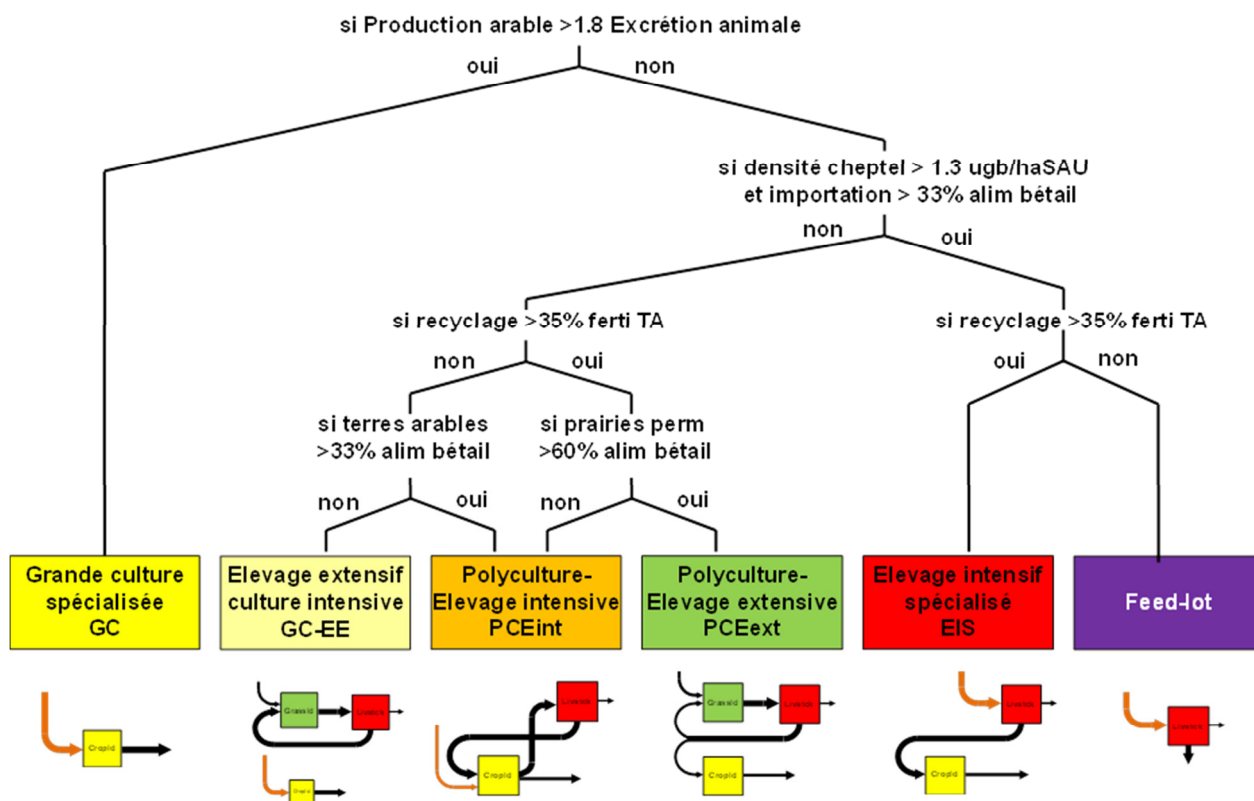


Figure 5. Arbre de décision de la typologie biogéochimique des systèmes de production agricole

3.2 Les trajectoires de la spécialisation

L'application des critères de cette typologie à l'ensemble des 22 × 33 représentations GRAFS couvrant les régions agricoles au cours de la période 1852-2012 permet de déterminer l'évolution régionale des systèmes de production. La figure 6 illustre ces évolutions.

Au XIXème et au début du XXème siècle la polyculture-élevage est le système de production agricole universel en France (Figure 6). La restitution active des nutriments prélevés par les cultures implique une bonne gestion des fumiers et fait de nécessité vertu. L'élevage est encore « *le mal nécessaire* » dont parlait Lavoisier (Risse, 2003), et la ferme est considérée comme « *une fabrique de fumier, les bestiaux sont des machines à fumier* » (Bertin, 1856). Les cycles biogéochimiques de l'N et du P restent fermés dans l'ensemble des territoires français, exception faite de l'Ile-de-France qui dépend déjà fortement d'importations pour l'alimentation humaine.

Dès le début des années 1930, on constate une tendance à la spécialisation en grandes cultures, sans doute permise par le développement de l'industrie des engrais chimiques azotés, l'expansion du chemin de fer et l'homogénéisation du marché national agricole (Duby et Wallon, 1993). Dès lors, l'agriculture française peut amorcer le passage d'une économie de subsistance où règne l'autoconsommation à une économie de marché où la production est davantage guidée par les avantages comparatifs et les possibilités d'écoulement sur le marché. Ce type de spécialisation s'étend progressivement mais nettement, d'abord à l'ensemble des régions du bassin parisien, puis à l'Alsace et enfin aux régions du Sud-Ouest. Dans ces régions, l'élevage disparaît pratiquement et la fertilisation des terres arables est de plus en plus dépendante des engrais chimiques (Figures 6.b & 6.c) A partir des années 60, on voit l'apparition de systèmes de culture intensive mais

préservant une activité d'élevage plutôt extensif. Ce type intermédiaire est caractéristique de la période 1960-2000 et semble disparaître dans la période récente. Les territoires concernés maintiennent une activité d'élevage significative mais utilisent principalement des engrais de synthèse pour fertiliser les terres arables (Figure 6.b & 6.f). Enfin, les années 80 annoncent le début d'un élevage spécialisé et intensif dans l'Ouest caractérisé par l'augmentation de la densité du cheptel (Figure 6.b) et une dépendance accrue aux importations depuis l'étranger pour l'alimentation du bétail.

Cependant un certain nombre de territoires ne suivent pas ce mouvement de spécialisation et continuent de fonctionner sur le mode de la polyculture-élevage. Ces systèmes ont pourtant pu s'intensifier puisque la densité de cheptel y croît également (Figure 6.b) et que les rendements arables progressent presque autant qu'en grandes cultures (Figure 6.a). Les déjections animales continuent d'assurer le poste principal de la fertilisation des terres arables en N (Figure 6.d & 6.e). Dans ces régions, intensification n'a donc pas été synonyme de spécialisation.

Cependant, si le degré d'ouverture des cycles biogéochimiques N et P demeurent aujourd'hui relativement restreint pour la production agricole dans les régions de polyculture-élevage, il importe de remarquer que ces régions exportent une partie de leur production vers d'autres régions plus densément peuplées et moins rurales (Le Noë et al. 2016). Si les apports en N pourraient être fournis par la fixation symbiotique de l'azote, le recours aux fertilisants chimiques P est, à terme, nécessaire tant que ces régions resteront exportatrices. La rupture métabolique entre ville et campagne (Foster, 2000) révèle ici l'incompatibilité structurelle entre l'économie circulaire parfois promue par les défenseurs d'une croissance verte et la séparation géographique de zones de production et de consommation. Le problème de la circularité des flux de matière ne saurait donc se résoudre par une approche purement technico-économique de la question puisque c'est l'organisation sociale et la division de la production qui semble être en jeu ici et qui transparaît au travers de l'ouverture des cycles de l'N et du P.

La spécialisation régionale des systèmes agricoles évolue au cours du temps, l'intensité de la production agricole au sein de chaque type de système également. On constate par exemple que la densité de cheptel et les rendements des terres arables (Figure 7.a & 7.b) progressent partout sur la période étudiée. A partir des années 60, les engrais de synthèse N augmentent drastiquement puis diminuent à partir des années 90 (Figure 8).

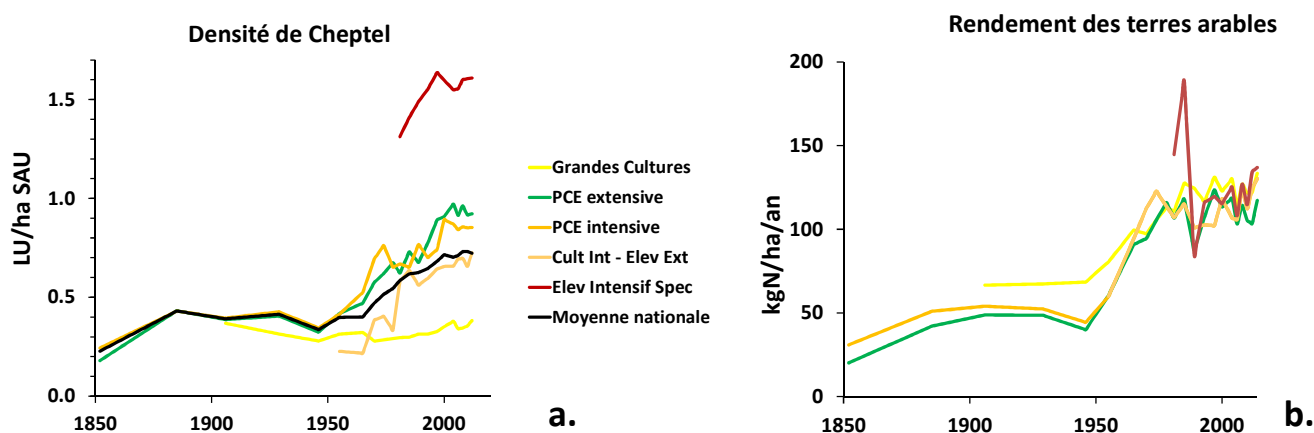


Figure 7. Evolution sur la période 1852-2014 de la densité de cheptel (a) et du rendement azoté des terres arables (b) des différents types de régions agricoles.

PIREN-Seine phase VII - rapport 2017 – Systèmes de production agricole depuis la fin du XIXe siècle

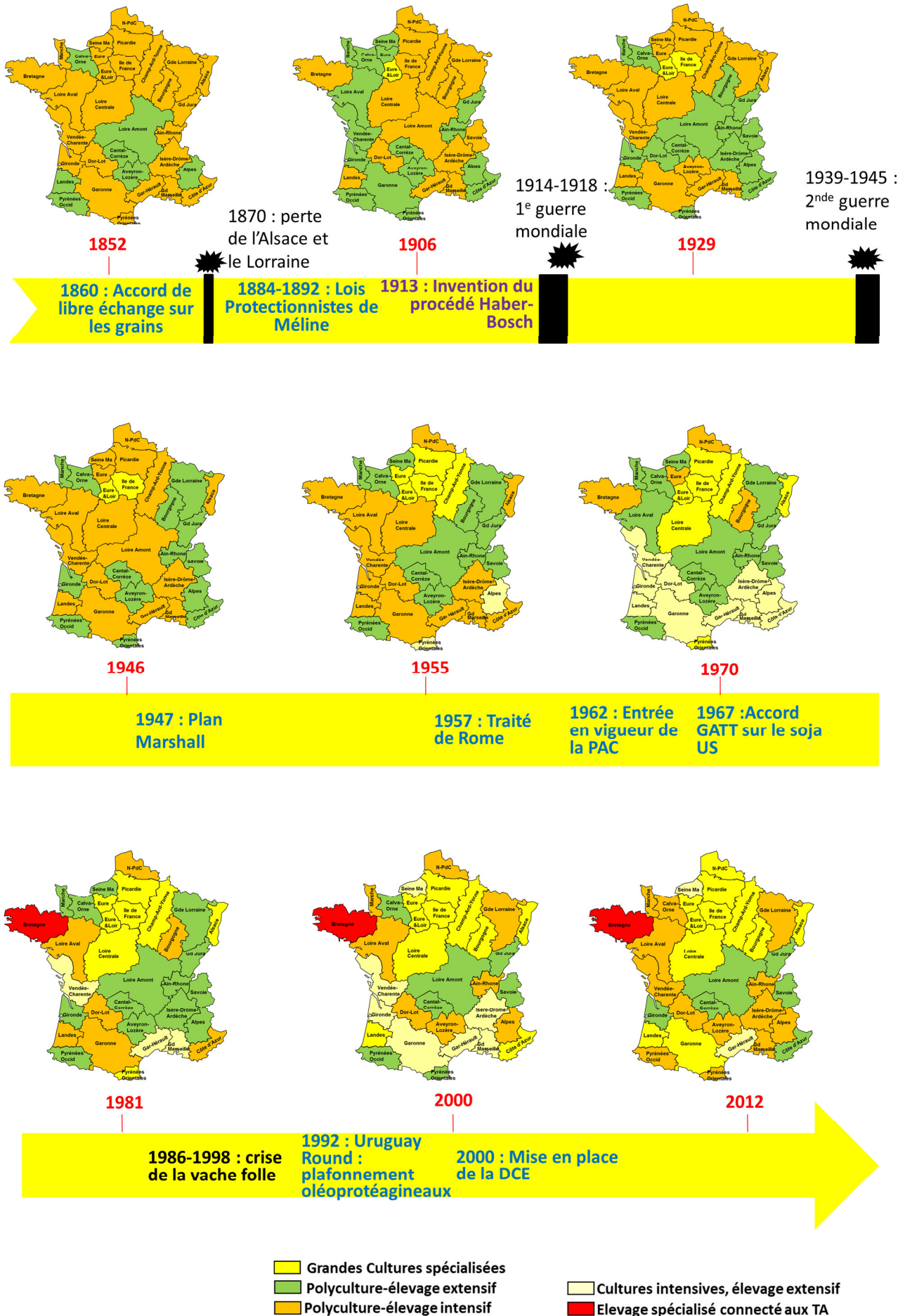


Figure 6. Chronologies des types de systèmes agricoles dans les régions françaises depuis 1852

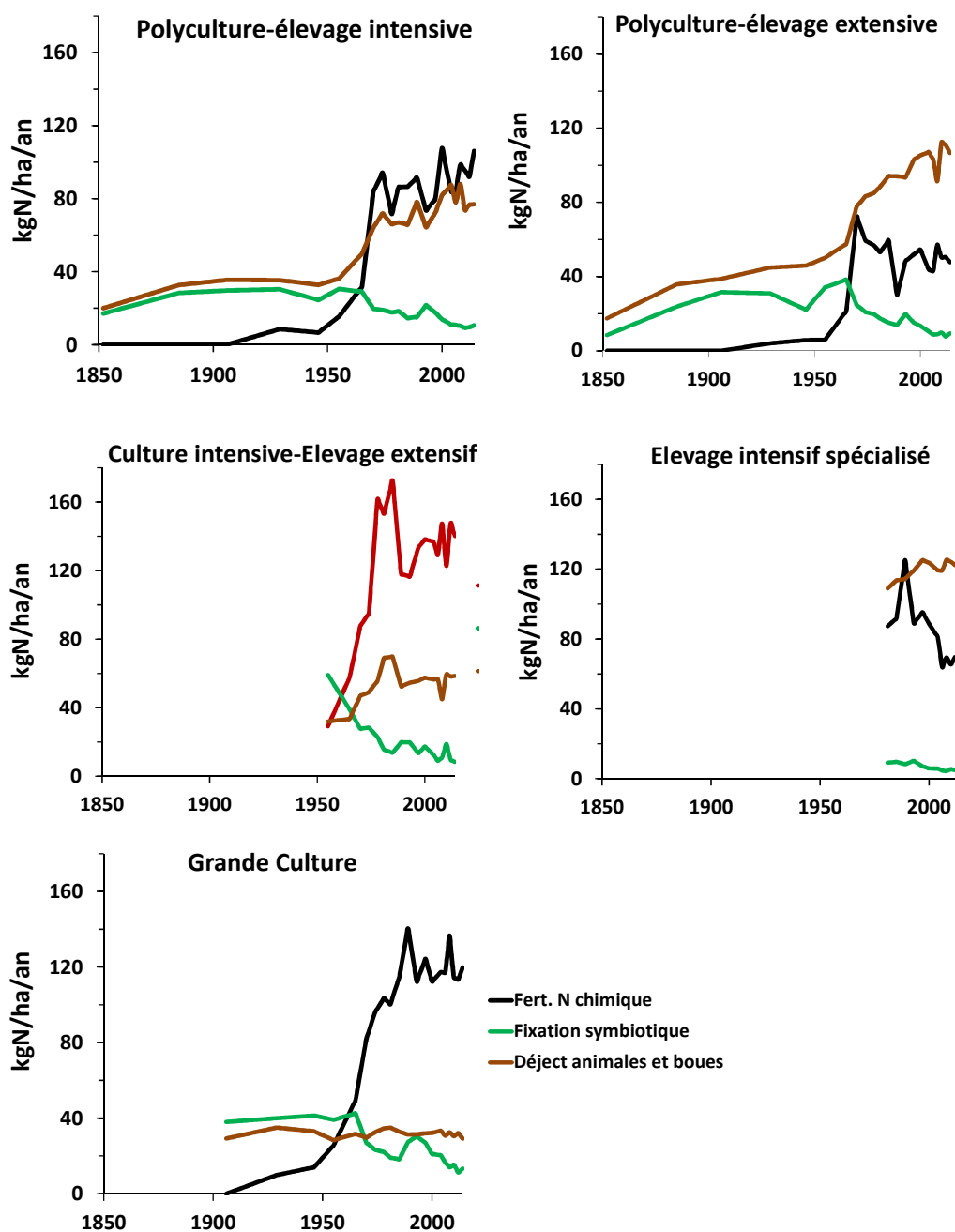


Figure 8. Evolution sur la période 1852-2014 des types d'apports de fertilisants azotés (chimiques, issus des déjections animales et de la fixation symbiotique) dans les différents types de régions agricoles.

3.3 Analyse historique des performances des types de systèmes agricoles

Pour évaluer les conséquences de l'évolution des systèmes agricoles et leur spécialisation, nous retiendrons deux indicateurs de leurs performances environnementales et agronomiques. Le bilan (ou surplus) des apports aux sols arables et de l'exportation par la récolte peut être considéré comme un indicateur pertinent des performances environnementales, car il renseigne sur les pertes ou l'accumulation possible de nutriment dans le milieu. Les performances agronomiques peuvent se mesurer, soit en termes de rendement à l'hectare (Figure 7b), soit en termes d'unités de nutriment exogène investies par unité de production (végétale et animales) exportée du système agricole, c'est-à-dire destinée à la consommation humaine locale ou à

l'exportation (à l'exclusion de la production végétale non recyclée dans le système agricole pour l'alimentation du bétail local). L'analyse de ce dernier indicateur est encore en cours, et nous nous limiterons donc ici aux indicateurs de performance environnementale.

Avant la généralisation des engrais chimiques en N et en P, c'est-à-dire avant les années 30, les bilans P et N sont faibles, voire négatifs pour le P, dans tous les types de régions (Figure 9). Les bilans N augmentent à partir des années 60 dans toutes les régions (Figure 9.a) mais de manière différenciée. Les régions de grande culture connaissent les bilans N les plus faibles. Cela peut s'expliquer par le fait que les engrais de synthèse constituent pratiquement la seule source de fertilisation et que les rendements arables y sont très élevés. Dans les régions de polyculture-élevage intensive et extensive, les bilans N des terres arables sont légèrement plus élevés mais restent à des niveaux relativement stables depuis 60 ans.

Contrairement aux régions de grandes cultures et de polyculture-élevage, les régions de culture intensive-élevage extensif et d'élevage intensif spécialisé connaissent un pic des surplus N des sols arables (Figure 9a). Pour les premières, ce pic a lieu dans les années 70-80 en raison d'apports en fertilisants synthétiques particulièrement élevés (Figure 8) combinés à des apports de déjections animales toujours significatifs. Pour les secondes d'élevage intensif, il a lieu dans les années 80-90, principalement en raison de l'augmentation de la densité de cheptel (Figure 7a).

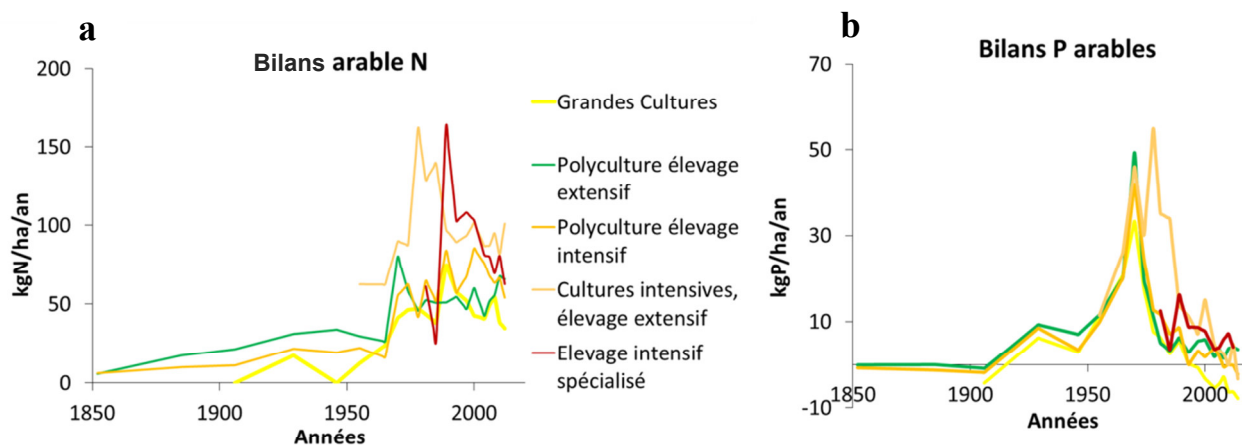


Figure 9. Evolution dans les différents types de régions agricoles sur la période 1852-2014 (a) des bilans azotés des terres arables, (b) des bilans phosphorés des terres arables.

Concernant les flux de phosphore, que les territoires se spécialisent ou non, la tendance au cours de la période 1960-1990 est la même partout. Le recours accru aux engrais chimiques pour la fertilisation des terres arables (Figure 9b) induit une augmentation des bilans P, qui atteignent un pic dans les années 70-80. Néanmoins, ces bilans décroissent dès les années 1990 et poursuivent encore aujourd'hui cette décroissance, probablement grâce au raisonnement de la fertilisation.

4 Conclusion

Au cours des 150 dernières années, les territoires restés en polyculture-élevage sont ceux où l'intensification de la production arable et la densification du cheptel ne se sont pas accompagnés d'une spécialisation agricole. Ainsi, dans les régions de polyculture-élevage, les cycles biogéochimiques de l'N et du P restent relativement fermés. Néanmoins, la période des années 1960-1990 est marquée pour tous les types de systèmes agricoles, y compris ceux de polyculture-élevage, par une fertilisation chimique en N et P considérable induisant un plus grand degré d'ouverture des cycles N et P. Cette période a conduit à l'accumulation de stocks de phosphore dans les terres arables et à des pertes d'azote considérables. Les conséquences environnementales locales ont été la pollution des systèmes aquatiques et de l'atmosphère. La

période plus récente est marquée par une diminution de la fertilisation chimique azotée et phosphorée, avec en conséquence, par une baisse des pertes environnementales de N et des bilans P plus faibles, souvent même négatifs dans les zones de grandes cultures.

Ce travail, descriptif mais quantitatif, vise à mettre en exergue la matérialité des systèmes de production agricole dans une perspective temporelle longue. Nous souhaiterions qu'il puisse s'enrichir d'analyses historiques, anthropologiques ou politiques permettant d'inclure cette description des flux de matière anthropiques et naturels dans celle des évolutions sociales et économiques au sein desquelles ils s'insèrent. D'un point de vue épistémologique, ce type d'approche, montrant concrètement l'artificialité de la dissociation des flux de matière anthropique et naturelle, pousse également à reconsidérer la dualité entre Nature et Culture (ou sociétés humaines). C'est autour de cette séparation ontologique que se sont construites les sciences humaines et sociales d'une part et les sciences naturelles d'autre part. Ce grand partage entre sciences de la nature, dédiées à l'étude des lois qui régissent le monde physique, et les sciences humaines et sociales, prenant pour objet les interactions humaines et l'édification historique de règles sociales, montre aujourd'hui ses limites. Nous pensons que la Nature devrait certes, être envisagée comme un fait social, mais un fait social particulier puisque, comme le montre l'exemple que nous venons développer ici, la Nature telle que nous la connaissons résulte à la fois des interactions avec les sociétés humaines et de processus biogéochimiques telles que le lessivage des nitrates, la volatilisation de l'ammonium ou encore l'accumulation du P dans les sols dont les lois en sont indépendantes. Les collaborations possibles entre sciences humaines et sociales et sciences de la nature engagent donc bien plus qu'un enrichissement mutuel de savoirs, elles sont porteuses d'une remise en question profonde du mode de production des connaissances et du rôle des scientifiques dans le paysage social et politique.

Bibliographie

- Bertin, A. 1856. Du fumier, de la culture et du bétail, en vue du fumier. Carette-Bondessein, imprimeur-libraire, Valognes
- Billen, G; Lassaletta, L & Garnier, J. (2014) A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Global Food Security*, 3: 209-219. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.003i>.
- Cramo M., Garcia-Ruiz R., Ferreira M. I., et al., 2017. The N-P-K soil nutrient balance of Portuguese cropland in the 1950s: The transition from organic to chemical fertilization. *Scientific Reports* 7:8111.
- Crutzen P.J. and Steffen W., 2003. How long have we been in the Anthropocene Era? *Climatic Change* 61, 251-257
- Duby G & Wallon (1993) *Histoire de la France rurale*, tome III De 1789 à 1914. Ed. Seuil, Paris. 560 pp
- Foster J.B. (2000). *Marx's ecology: Materialism and Nature*. Montly Review Press, New York.
- Galloway J.N., and Cowling E.B., 2002. Reactive Nitrogen and the World: 200 Years of Change. *Ambio : A Journal of the Human Environment*, 31(2):64-71 Royal Swedish Academy of Sciences.
- Garnier J., Lassaletta L., Billen G., Romero E., Grizzetti B., Némery J., Le Q.L.P., Pistocchi C., Aissa-Grouz N., Luu M.T.N., Vilmin L. Dorioz J.-M. (2015). Phosphorus budget in the water-agro-food system at nested scales in two contrasted regions of the world (ASEAN-8 and EU-27). *Global Biog. Cycle*. 10.1002/2015GB005147.
- Girardin, J. 1864. *Des fumiers et autres engrais animaux*. Garnier Frères, Paris
- Gros, A (1957). *Guide pratique de la fertilisation*. La Maison Rustique, Paris. 355 pp
- Gueymard, E. 1868. *Recueil d'analyses chimiques à l'usage de l'agriculture moderne*. Imprimerie de Prudhomme, Grenoble
- Güldner D., and Krausmann F., 2017. Nutrient Recycling and Soil Fertility Management in the Course of the Industrial Transition of Traditional, Organic Agriculture: The case of Bruck Estate, 1787-1906). *Agriculture Ecocystem Environment* 249, 80:90
- Haberl H., Erb K.H., Krausmann F., et al., 2007 Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *PNAS* 104 (31) 12942-12947
- Harchaoui S., Chatzimpiros P., 2017. Reconstructing production efficiency, land use and trade for livestock systems in historical perspective. The case of France, 1961-2010. *Land Use Policy* 67, 378-386
- Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Anglade J., Garnier J. (2014). 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9. DOI:10.1088/1748-9326/9/10/105011
- Le Noë J, Billen G, Lassaletta L, Silvestre M, Garnier J. (2016). La place du transport de denrées agricoles dans le cycle biogéochimique de l'azote en France : un aspect de la spécialisation des territoires. *Cahiers Agricultures* 25, 15004. DOI: 10.1051/cagri/2016002
- Le Noë J, Billen G, Garnier J (2017). How the structure of agro-food systems shapes nitrogen, phosphorus, and carbon fluxes: the Generalized Representation of Agro-Food System applied at the regional scale in France. *Science of the Total Environment* 586: 42–55.
- Le Noë J, Billen G, Garnier J (2018). Phosphorus management in cropping systems of the Paris Basin : from farm to regional scale. *J. Environ. Management*. 205: 18-28.
- McNeill J.R. (2010). *Du nouveau sous le soleil : une histoire de l'environnement mondial au XXe siècle*. Traduit de l'anglais par Philippe Beaugrand. Seyssel, Champ Vallon, « L'environnement a une histoire », 2010, 523 p.
- Mello FC, Field RA, Riley ML (1978). Effect of age and anatomical location on composition bovine bone. *Journal of food science* 43 :677-679

- Noirfalise, A. (1974). Conséquences écologiques de l'application des techniques modernes de production en agriculture. Informations Internes sur l'Agriculture. Commission des Communautés Européennes. N°137. Novembre 1974.
- Risse, J (2003) Histoire de l'Elevage en France. L'Harmatan, Paris , xx pp.
- Rockström J., Steffen W., Noone K. et al., 2009. A safe operating space for humanity. Nature 461, 472-475.
- Soto D., Infante-Amate J., Guzman G. I., et al., 2016. The social metabolism of biomass in Spain, 1900-2008: From food to feed-oriented changes in the agro-ecosystems. Ecological Economics 128, 130-138.
- Smil V (2000) Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences. Annu Rev Ecol Evol Syst 25:53-88
- Timons Roberts J. and Parks B.C., 2009. Ecologically Unequal Exchange, ecological Debt, and climate Justice, International Journal of Comparative Sociology, 50, 385-409
- Toutain, JC (1971). La consommation alimentaire en France de 1789 à 1964. Economie et Société 5 : 1909-2049.